

多連結型マリーナ用浮棧橋の開発に関する実験的研究

Experimental study on a flexible floating pier consisted of small pontoon units for marina

山本 剛*・野田英明・松原雄平・黒岩正光**・尹 吉秀***・上原義正****・武内孝徳*****

Takeshi Yamamoto, Hideaki Noda, Yuhei Matsubara, Masamitsu Kuroiwa,
Gil-Su Yoon, Yoshimasa Uehara and Takanori Takeuchi

Abstract

This study is concerned with the development of a new floating pier for marina. This flexible floating piers consists of many small pontoon units and is moored by chains. The dynamic behavior of the floating piers due to waves is investigated through laboratory tests. The motions and the tension forces of mooring lines of the piers were compared with those of a rigid type floating piers under various wave conditions. The results show that the flexibility of the joints is a dominating parameter for the movement the floating piers for the marina.

Keywords : Dynamic behaviour, Flexible floating pier, Marina

1. はじめに

近年、船舶の係留施設の不足から放置艇が社会問題化している。この原因には、海洋性レジャーの普及によるプレジャーボートの増加が挙げられる。プレジャーボートの係留施設の種類には、係船岸、棧橋、係船杭および係船ブイなどがある。その中でも、狭い水域で多数の船舶を係留でき、比較的建設の容易な棧橋が主に用いられている。この棧橋の係留方法のほとんどは鋼管杭あるいはPC杭によるものである。我が国のような欧米諸国と比べて泊地が不足している場合においては、干満が大きくまた比較的波高の大きな海域にも係留施設を設置するような事態が起こり、そのような係留方式の棧橋では対応できなくなる場合もあるであろう。また、水面から突出した杭は景観を損なう可能性があり、設計の際配慮が必要である。

一般に、棧橋のフロート部の材料としては、コンクリート、鋼、およびプラスチックなどが用いられている。しかし、コンクリートや鋼では海水による腐食や、重量等の問題があるため、今後はゴムやプラスチックなどの繊維材料が多く使用されると考えられる。しかし、このような繊維材料では強度に問題があり、波力ならびに曲げ等に対する耐力を低減させる必要がある。

平石ら¹⁾は針葉樹等の木材を利用した非常に柔軟なマリーナ用の棧橋を提案し、さらに波除堤としての機能について検討している。しかしながら、設計上必要な耐波力、曲げ応力等については検討されておらず、適切な設計手法を確立するには至っていない。

本研究では、FRP材料を用いた新たな柔構造を有する鎖係留型の浮き棧橋の開発を目的とし、まず、その第一段階として、模型実験によってその棧橋の動揺特性、係留力および係留浮体による消波特性について検討する。さらに浮体の動揺量低減工法を考案し、その効果をも実験的に検討する。最終的に、浮き棧橋の設計法を確立する上で有用な資料を与えようとするものである。

2. 多連結型マリーナ用浮き棧橋の概要

多連結型浮き棧橋とは、図-1に示すような原寸の小型ポンツーンを多連結することによって一つの棧橋ユニットとするもので、その概念図を図-2に示す。各ポンツーン間はジョイントによって連結し、棧橋ユニットは全体でフレキシブルな構造とする。係留方法は景観、現場施工性およびメンテナンス性を考慮して、出来るだけ杭は少なく鎖係留で固定し

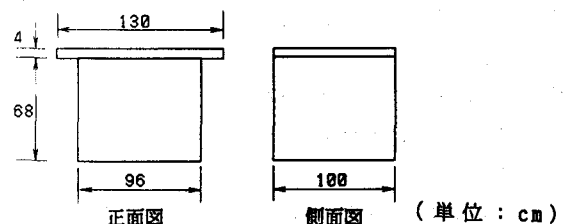


図-1 小型ポンツーンの形状

* 正会員 ニッタ(株)

** 正会員 鳥取大学工学部土木工学科(680 鳥取市湖山町南4-101)

*** 釜山水産大学校海洋工学科

**** 学生会員 鳥取大学大学院

***** (株)ウエスコ

ようにするものである。また、栈橋のポンツーン部を小型化することによって、現場への運搬性、施工の容易さあるいは図-2に示したようなウォークウェイとフィンガーの構成だけでなく様々な栈橋構成が考えられる。

一般にマリーナ用浮き栈橋は、主にポンツーンを連結したものが用いられている。剛構造の場合は水

粒子の運動が浮体によって妨げられ、そのため発生する曲げモーメントによってポンツーンの連結部に過度の力が働き、破損する場合がある。このような連結部に作用する曲げ応力を抑えるために、栈橋全体が波に追従するような構造、すなわち、フレキシブルな連結構造とするのが望ましい。しかしながら、利用者側から見れば、剛構造の方が歩行しやすく、剛性の低下は最小限にとどめる必要がある。

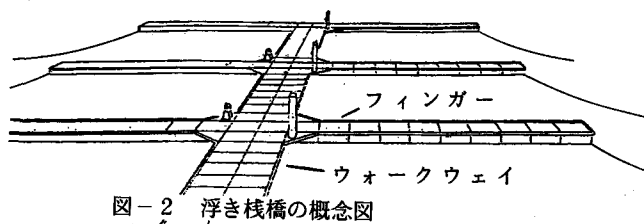


図-2 浮き栈橋の概念図

3. 実験装置および方法

栈橋模型は図-3に示すとおりで、小型ポンツーンユニットを幅方向に2個連結し、さらに長さ方向にそれを10個、ジョイントによって連結したウォークウェイタイプとした。この長さ方向のジョイントの構造を種々変化させることによって、栈橋ユニット全体の剛性を変化させることが可能で、本実験では、剛性の影響による栈橋の波浪

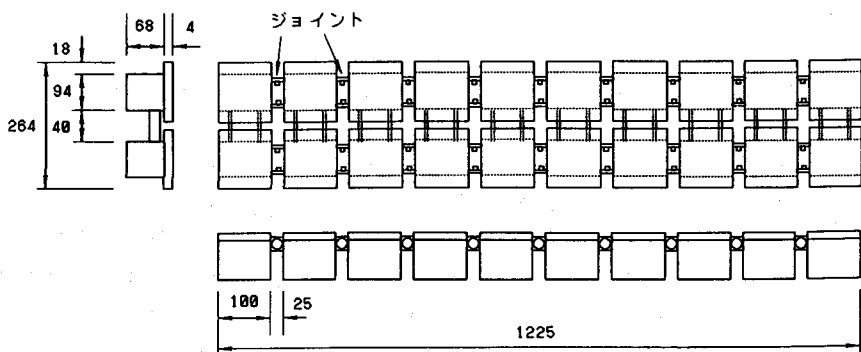


図-3 浮き栈橋模型の形状

(単位 mm)

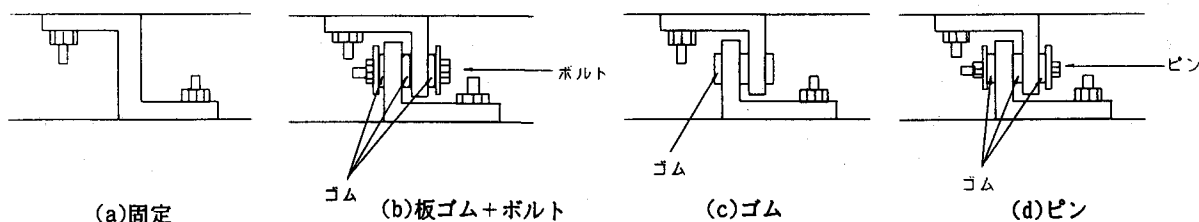


図-4 ジョイント概略図

応答特性について検討するため、図-4に示すような4種類のジョイントを用いた。すなわち、金具で固定する最も剛性の強いもの(A)、20mm(25mm)板ゴムをボルトで固定したもの(B)、ゴムで固定したもの(C)、およびピンだけのヒンジ結合で最もフレキシブルなもの(D)である。また、図-5は動揺低減を目的とした抵抗板を取り付けた場合のポンツーンユニットを

示したもので、2種類の抵抗板(高さ: 25mm, 50mm)を用いた。

実験は図-6に示すような、長さ 25m、幅 0.6m、高さ 1.1m の一部片面ガラス張りの2次元波動水槽を用いて行った。水槽の一端にはフラッター式造波機、他端には消波装置が設置されている。同図に示すように模型は造波板から 13.5m の位置に波峰線と模型長軸が垂直になるように設置した。栈橋はφ3mmのチェーンを4本用いて係留し、長さは水深の4倍(120cm)とした。波の反射率および透過率を測定するため波高計を岸側ならびに沖側

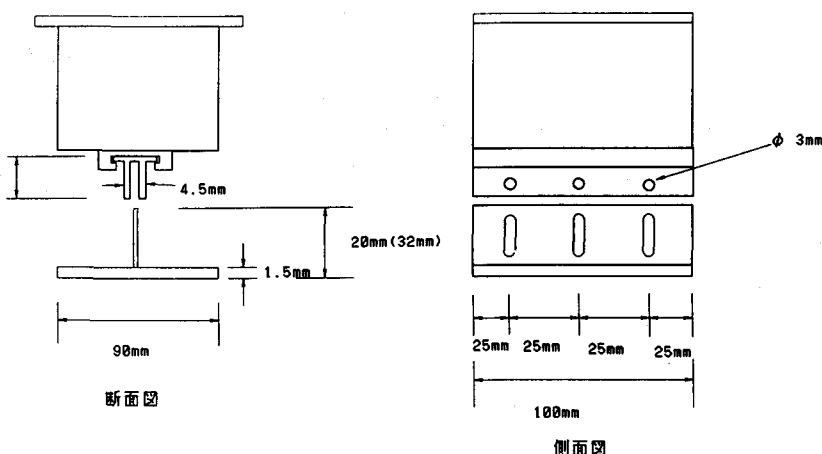


図-5 抵抗板概略図

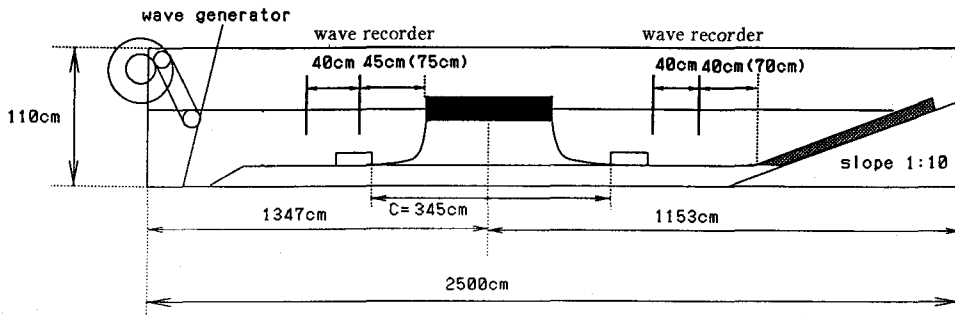


図-6 実験水槽と模型の配置図

にそれぞれ2本設置した。波浪条件は表-1に示すとおりで、水深は30cmとし、規則波を作用させた。

動揺量は模型側面からビデオ撮影し、パーソナルコンピュータで2次処理することによって求め、浮体の沖側および岸側それぞれについて浮体部およびアンカー部にかかる係留索張力は専用測定装置(ひずみゲージによる)を用い測定した。反射率・透過率は合田²⁾による入・反射推定分離法から求めた。表-2は、ジョイント、抵抗板の組み合わせによる実験モデルの特性を示したもので、モデル1を剛構造とし、モデル2, 3および4を柔構造とする。またモデル5および6はモデル2に抵抗板を取り付けたものである。表中に示す固有周期はサージングのもので、抵抗板を取り付けることによって、固有周期が長くなることがわかる。

表-1 波浪条件

	波高(cm)	周期(sec)
1	3	0.9
2		1.0
3		1.2
4		1.5
5		2.0
6	6	0.9
7		1.0
8		1.2
9		1.5
10		2.0

表-2 実験モデル

番号	Joint	抵抗板	重量(kg)	剛性(kg・cm ²)	固有周期(s)
1	A	-	5226.0	19863	1.7
2	B	-	5686.0	1047	1.7
3	C	-	5465.0	311	1.7
4	D	-	5632.0	ヒンジ	1.7
5	B	25mm	6550.0	1047	1.96
6	B	50mm	6620.0	1047	2.19

4. 実験結果および検討

(1) 浮体の動揺量に関する検討

図-7(a)および(b)は、波高6cm、周期0.9secの波の1周期分の水面変動に対する各ポンツーン部の動揺状況を表したもので、それぞれ、モデル1およびモデル2の結果である。図中の縦軸は静水状態を基準とした鉛直変位、横軸は浮体の沖側を基準とした水平座標で、波の進行方向を正にとってある。なお図中に示す点線は水面変動、実線は橋脚の動揺状況を表す。この図から、モデル2(柔構造型)は、波と追従し、運動しているのがわかる。一方、モデル1(剛構造型)は若干の柔軟性を示しているが、浮体の形状は常に直線的で、完全な剛体とみなしうる。本実験のすべてのケースにおいて、沖側のポンツーンの変位が最も大きくなる傾向がみられた。したがって、最も沖側のポンツーンの結果で鉛直方向の動揺を評価することにする。図-8は横軸に浮体長 l と波長 l との比、縦軸に鉛直方向の浮体の全振幅 Y と波高 H との比をとってモデル別に表したもので、波高6cmの場合の結果である。この図から $l/L < 0.7$ では各モデルとも大きな差異は見られない。一方、 $l/L > 0.7$ ではモデル2~4はモデル1(剛構造)に比較して Y/H は増大し、ほぼ1に近づいており、柔構造

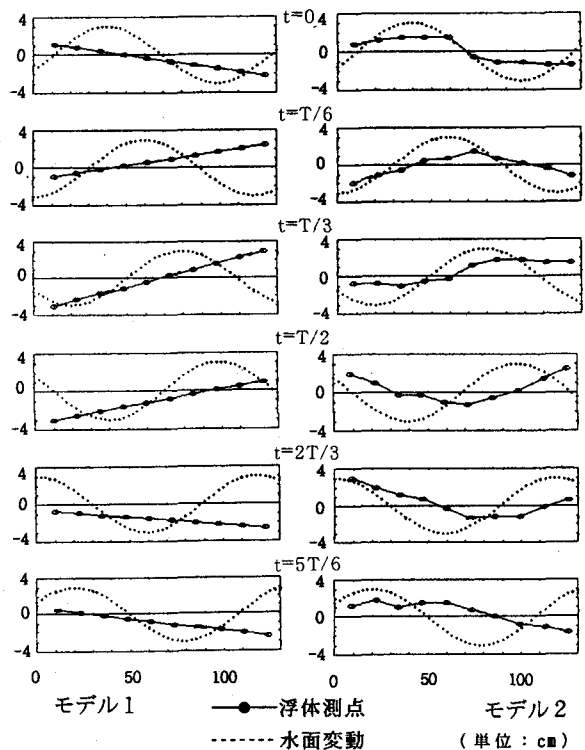


図-7 浮体の運動と水面変動

浮体が波に追従していることをがわかる。すなわち、波長が浮体長に近づくにつれ、剛性低下の影響をかなり受けていることがわかる。図-9は水平方向の同様の結果を示したものである。この図から剛性の相違による差はみられないが、モデル1から4の固有周期($t=1.7$; $1/L=0.452$)の付近で急激な増加がみられる。この増加はサーージングの固有周期に関連する浮体の数や係留システムを検討し、固有周期を設計波の周期から離すことにより、制御できるだろう。

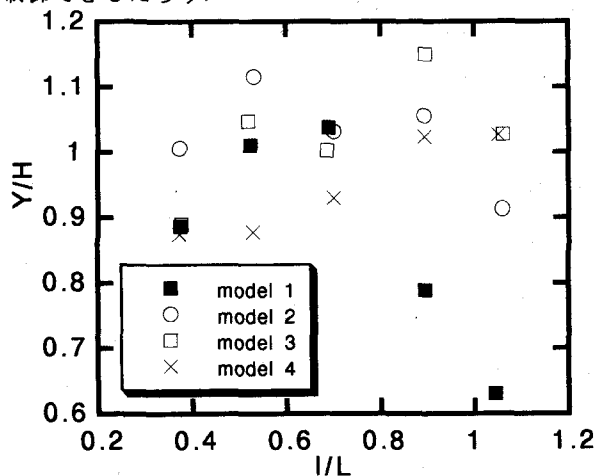


図-8 鉛直変位（剛性による比較）

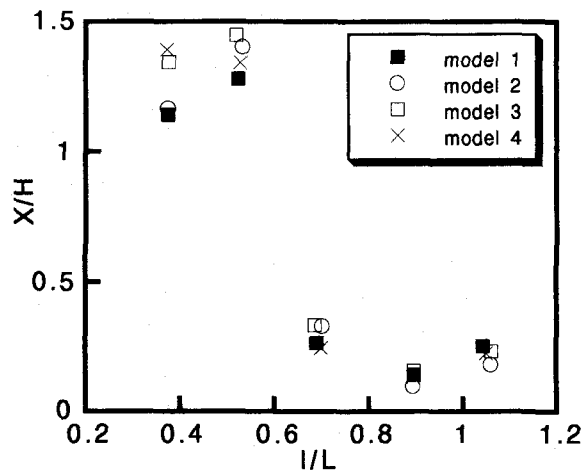


図-9 水平変位（剛性による比較）

(2) 係留索張力に関する検討

波の作用により栈橋模型は岸沖と往復運動をしながら、若干、岸側へ定常的に変位していることが観察され、また、岸側の浮体部およびアンカー部にかかる係留索張力は沖側のそれらと比較して小さいことから、沖側の索張力のみについて検討すれば良いと考えられる。したがって、以下沖側における索張力の結果のみについて検討する。

図-10は、波高が6cmの場合の沖側の係留索のアンカー部における無次元索張力 F/wBH (B : 浮体幅, w : 水の単位体積重量) と $1/L$ との関係を示したものである。この図からモデル1では、 $1/L > 0.7$ において $1/L$ が増加するにつれ、無次元索張力が増加している。それに対し、モデル2, 3および4では同様に索張力が増加するが、 $1/L$ が0.9を越えると逆に減少しているのがわかる。

図-11は沖側の係留索の浮体部の同様の結果を示したもので、この図からモデル1~3は $1/L > 0.7$ において $1/L$ が増加するにつれ索張力が増加し、モデル4だけが $1/L > 0.9$ で減少傾向にある。また $1/L < 0.7$ でもモデル4は他と比べ低くなっていることがわかる。全体的に、剛構造と比べると柔構造での索張力の減少がみられ、特にモデル4では柔構造による波力の低減効果が期待できる。

これらの図から、全体の傾向として次のことがわかる。いずれの場合も $1/L=0.7$ で極小となり、その前後で無次元索張力が増加している。特に、 $1/L < 0.7$ での無次元索張力は、 $1/L > 0.7$ のそれと比較して、かなり大きく、無次元水平全振幅（前出し図-9）に大きく影響していることがわかる。すなわち、 X/H が増大するに伴って、沖側浮体部ならびにアンカー部の無次元索張力は大きくなっている。一方、 $1/L > 0.7$ においては全体的に小さくなっているがモデル4はモデル1, 2および3に比較して剛性低下の影響が顕著に現れている。

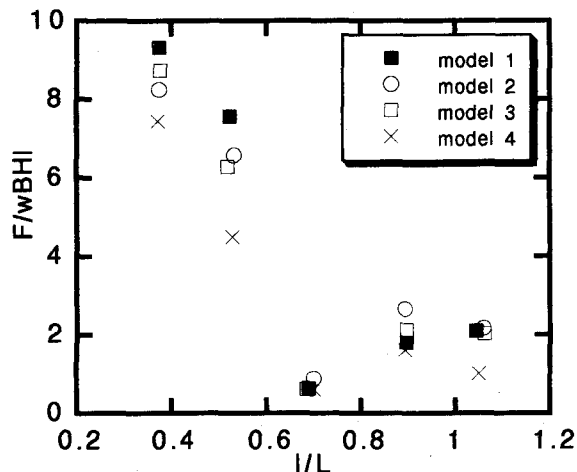


図-11 係留索張力（浮体部）

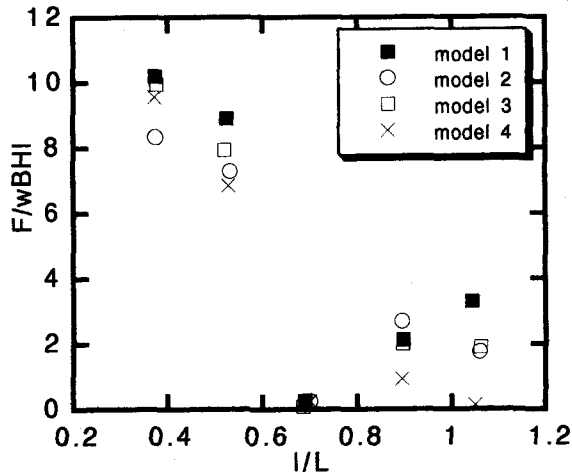


図-10 係留索張力（アンカー部）

(3) 消波特性に関する検討

図-12および13は、波高が6cmの場合のそれぞれ反射率 K_r および透過率 K_t と $1/L$ との関係を示したものである。図-12の結果から反射率は $1/L < 0.7$ において $1/L$ が大きくなるにつれ小さくなっており $1/L = 0.7$ 付近において0.05以下となっているのがわかる。なお、モデル2および4では $K_r = 0.2$ から0.05以下まで減少している。一方、 $1/L > 0.7$ では比較的剛なモデル(1, 2)では $1/L$ が増加するにつれて K_r も増加するが、柔なモデル(3, 4)では $K_r = 0.05$ でほぼ一定である。この原因は浮体を構成する剛性が小さくなるにつれ波に追従するため、 $1/L$ が大きくなっても浮体による波の反射が抑えられていると考えられる。一方、透過率は $1/L < 0.7$ において、 $1/L$ が増加するにつれ、 K_t は減少しているのがわかる。モデル別に見ると、顕著な相違は見られない。図-14は反射率と透過率より求まるエネルギー損失 $C_v = (1 - K_r^2 - K_t^2)$ と $1/L$ との関係を示したものである。この図から $1/L = 0.5$ の点を除くと、 $1/L$ が増加するにつれ C_v がほぼ直線的に増加している。剛性を小さくすることにより、浮体は波に追従し、水平および鉛直方向の動揺量は変化するが、波エネルギーの低減効果はほとんど見られなかった。

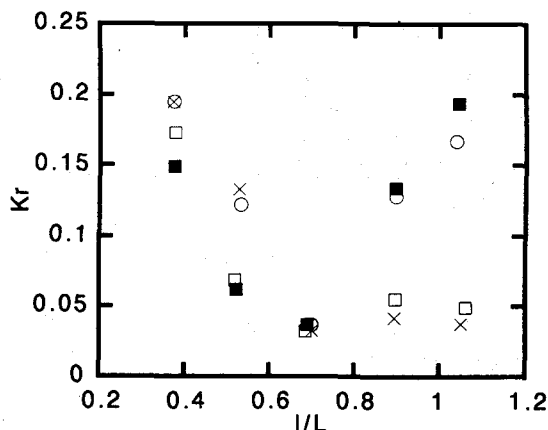


図-12 反射率

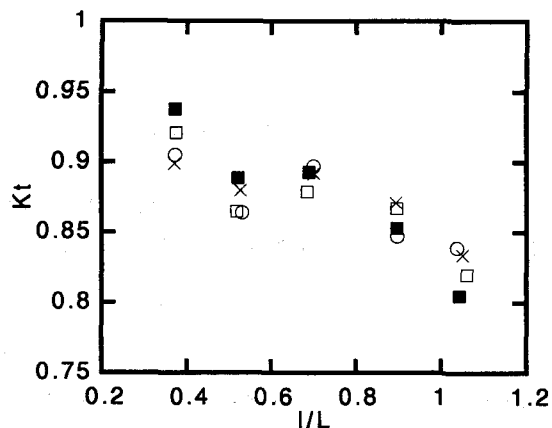


図-13 透過率

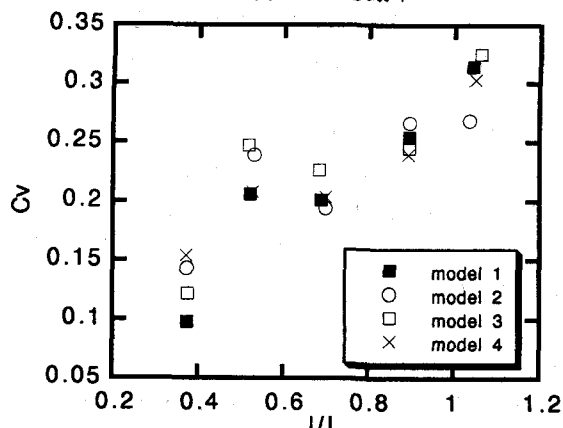


図-14 エネルギー損失

(4) 抵抗板の効果に関する検討

柔構造浮体では剛構造に比べ、動揺量が大きくなり利用者にも不快感を与えるであろう。したがって、剛性を小さくすると、浮体に作用する波力ならびに係留索張力を低減できるが、それに反して動揺量は大きくなる。したがって動揺量を低減させるため、抵抗板を浮体下部に取り付けた実験を試みた。

図-15は図-8と同じく波高6cmの場合の浮体の沖側ポンツーン部の鉛直方向の全振幅 Y と波高 H の比と $1/L$ との関係を示したものである。モデル5および6(抵抗板有)の動揺量はモデル1(剛構造型)の同程度の動揺量に抑えることはできないが、モデル2(抵抗板無)と比べると、 $1/L > 0.7$ の範囲において Y/H が小さくなり、抵抗板による動揺の低減効果が現れている。

図-16は図-9と同様の X/H と $1/L$ の関係を表している。この図から明かなように、モデル1, 2の結果において $1/L = 0.5$ 付近にピーク値が現れ、 $1/L > 0.7$ ではかなり小さくなっている。一方、モデル5, 6ではピーク値は存在せず、 $1/L$ が大きくなるにしたがい X/H は小さくなっているのがわかる。すなわち、表-2において示したように抵抗板を取り付けることによってサージングの固有周期が長くなり、水平方向の動揺量に大きく影響を及ぼすことがわかる。

実際の設計に用いられている波の周期は4~6sec程度で、これを本研究における模型(1/10縮尺)に換算すると0.6~1.9secとなる。栈橋の水平変位を考えた場合、本実験で使用した模型のサージングの固有周期は1.7~2.0secで本モデルをそのまま設計に適用すると、共振現象を伴い変位が増大する恐れがある。したがって、ポンツーン数を増やすあるいは抵抗板などによって、さらにサージングの固有周期を変化させる必要がある。

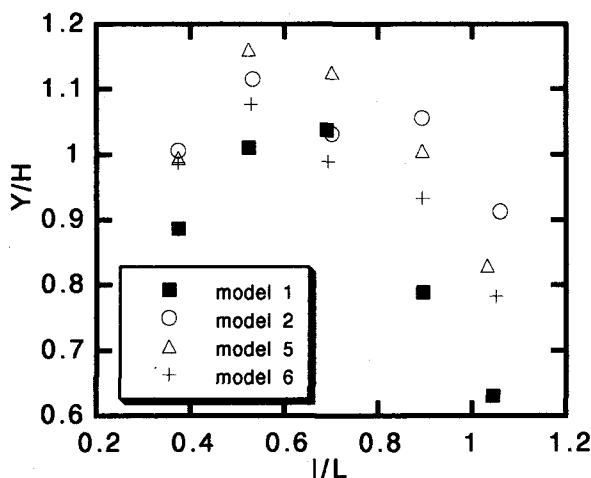


図-15 鉛直変位（抵抗板による比較）

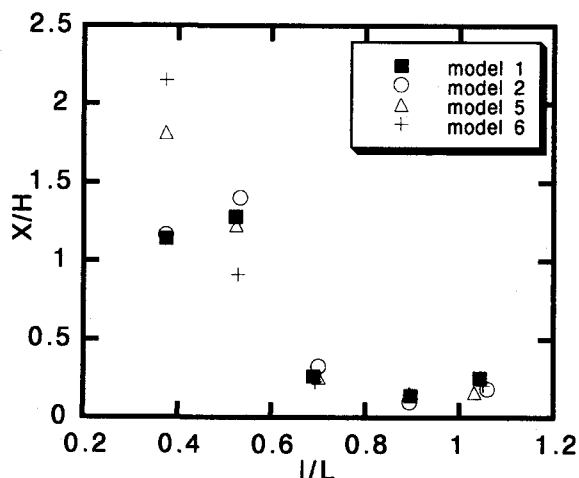


図-16 水平変位（抵抗板による比較）

5. おわりに

本研究では新たなマリーナ用浮き桟橋を提案し、波による動的応答特性について実験的に検討した。得られた結果を要約すると次のようである。

1) 浮体の動揺量は各ポンツーンの連結部の構造の違いによって異なり、浮体長波長比に関係する。すなわち、 $l/L > 0.7$ の範囲において無次元鉛直変位は剛性の低下により増大することがわかった。また、柔構造にすることにより、係留索に作用する張力を低く抑えられることがわかった。

2) 透過率についてはモデルによる違いはみられなかったが、柔構造にすることにより反射率を低く抑えられることがわかった。

3) 抵抗板を取り付けることにより、 $l/L > 0.7$ の範囲において鉛直方向の動揺低減効果が得られることがわかった。また、サージングの固有周期が変化し、水平動揺量に影響を及ぼすことがわかった。

最後に、 $l/L = 0.7$ 付近を境に動揺量および索張力の特性が変化するようであるが、その原因については明かでない。今後、設計手法確立のため、多連結型浮き桟橋の波による動揺量ならびに係留索張力の計算手法を開発する必要がある。

参考文献

- 1) 平石哲也，高山知司，鹿籠雅純，松永栄一：マリーナ用柔構造浮体の特性に関する水理模型実験，海岸工学論文集，第39巻，pp.796～800，1992.
- 2) 合田良実，鈴木康正，岸良安治：不規則波における入・反射波の分離推定法，技研資料（運輸省港湾技術研究所），No.248，pp.1～24，1976.